

風力換気装置を有する住宅を対象とした周辺気流性状の把握と室内換気効果の予測

創造理工学専攻 環境都市コース 6164110013-6 長田 啓志
(指導教員 近本智行)

1. はじめに

近年住宅の高気密・高断熱化が進み、換気不足によるシックハウス症候群を防止するため、現在では居室への機械換気装置の設置が義務化されているが、省エネルギー及び快適性の観点からは、自然通風が可能な時間をより長く確保することが有効と考えられる。また密集市街地では、壁面間の対面開口では風圧係数差が小さく換気駆動力を確保できないため換気量を確保することが困難である。そこで本研究では密集市街地でも換気が期待できる風力換気を促す装置(以下、換気促進装置)に着目し、換気促進装置を有する住宅の適切な換気性能評価を目的としている。まず基礎的なデータ整備を目的として風洞実験により風圧係数の整備、換気促進装置周辺気流の2次元風速の測定を行うと共に PIV を用いて、周辺気流性状を明らかにする。また得られた基礎データと気象データを用いて風力換気及び重力換気を考慮した単室の換気量計算を行い、換気促進装置を有する住宅の自然換気性能を換気回数にて評価する。さらに、風圧係数差が小さく換気量が低く算出される場合に、乱れの影響を考慮した換気効果を CFD 非定常計算によって越屋根の居住域換気性能の検証及び評価を行うことを目的とする。

2. 研究対象建物

日本建築学会標準住宅モデルに基づいた吹き抜けを有する建物形状を想定し研究を行う。対象建物模型(3.0mm厚亚克力板製)は図1に示す縮尺1/70の模型とし、勾配屋根に付設した越屋根付設建物(Pitched Monitor Roof)と陸屋根に付設した越屋根大中小(Flat Monitor Roof)及びチムニー付設建物大中小(Chimney)、さらに換気促進装置なし(Flat Roof)の4種類とし対象建物は全8条件とする。越屋根・チムニー部分のみ本体から着脱可能なものとし、装置サイズは図1に示す。周辺建物模型(7列×7列)は、対象建物模型と同サイズに設定し、対象建物模型を中心として配置し、隣棟間隔 $D/L=0.75, 1.0, 1.25, \infty$ (D:建物間の距離、L:建物の幅)を実験パラメータとした。

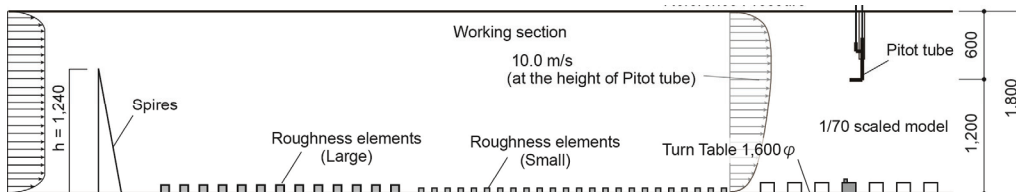


図2 立命館大学風洞実験室(回流式ゲッチング型)

3. 風洞実験

3.1 風洞概要

風洞実験は風速測定から装置周辺気流性状の把握と風圧測定から換気駆動力の評価と換気計算の境界条件取得を目的とする。図2に示す立命館大学研究用風洞を使用し、対象建物模型及び周辺建物模型を境界層流にさらして実験を行った。境界層流の作成には、スパイヤとラフネスを用い、風洞床上1200mmの位置にピトー管を設置し、ピトー管位置で平均風速を10m/sに設定した。図3にI型熱線流速計を用いて測定したアプローチフローの平均風速と乱流強度を示す。このときサンプリング周波数は1000Hz、平均化時間は60秒とし、風洞内基準静圧はピトー管の静圧とした。べき指数は、概ね1/3.5であった。



図1 対象建物模型

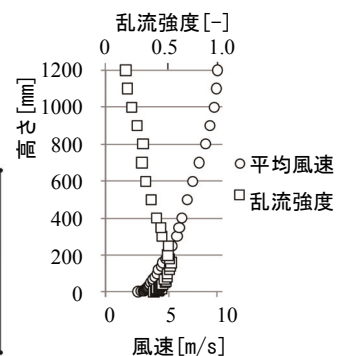


図3 アプローチフロー

3.2 風洞実験概要

1) 風圧実験

開口単一の風圧係数測定を目的として、模型には開口を設けず気密なものとしたものとした。図 1 に示す模型のプロットは風圧測定点であり、均等配置で開口部高さに設定し、サンプリング周波数 100Hz、平均化時間は 30 秒とし、微差圧計(DP-45、バリダイン社)により行い、風洞内基準静圧はピトー管の静圧とした。これに加え、越屋根開口を両側開放したときの基部の鉛直方向の換気駆動力を表す風圧係数(以下、基部の風圧係数)も測定した。基部の風圧係数の測定にあたっては、越屋根の両端を開けた際の室内圧を採用し、測定を行った 3 点の平均値とした。また、越屋根の鉛直開口面は平側に設けた。

2) 風速測定概要

X 型熱線風速計 (日本カノマックス model 0249R 5 μ ϕ タングステン) 及び 3 次元トラバースを用いて、換気促進装置の周辺風速を測定した。なお、実験条件を表 1 に示す。また、測定点は装置周辺の剥離を伺える位置に設置し、各条件 70 点から 100 点の測定点においてサンプリング周波数 1000Hz、平均化時間は 30 秒とし測定する。

3) 可視化及び PIV 測定概要

風洞外部に設置したスモークマシンに接続したホースにより煙を模型風上側に注入し、模型後流側に設置した CW:YAG レーザーにより可視化を行い、高速カメラ (SA5、Photron 社) を用いて 2000fps で撮影を行った。また得られた動画を PIV にて解析を行った。なお PIV 実験条件及び解析条件は表 1 と表 2 に示す。

表 1 風速測定・PIV 測定条件

Surrounding Buildings	Exist						Not Exist					
	0°		90°		180°		0°		90°		180°	
Wind Direction	0°		90°		180°		0°		90°		180°	
X-hotwire/PIV	X	PIV	X	PIV	X	PIV	X	PIV	X	PIV	X	PIV
Chimney (S)	○	x	x	x	○	x	○	○	x	x	○	x
Chimney (M)	○	○	x	x	○	x	○	○	x	x	○	○
Chimney (L)	○	x	x	x	○	x	○	○	x	x	○	x
Pitched Monitor Roof	○	x	○	x			○	○	○	x		
Flat Monitor Roof (S)	○	○	x	x	○	x	○	○	x	x	○	○
Flat Monitor Roof (M)	○	x	x	x	○	x	○	○	x	x	○	○
Flat Monitor Roof (L)	○	x	x	x	○	x	○	○	x	x	○	○

表 2 PIV 解析条件

Camera Frame Size	1024pixel × 1024pixel
Camera Frame Rate	2000fps
Program	Davis 8.05
Algorithm	Direct Cross-Correlation Method
interrogation Windows Size	Multi Pass 1: 32pixel × 32pixel
	Multi Pass 2: 12pixel × 12pixel
Total Number of Vector	86 × 86
over lap	0%
Sampling Time	About 1.0s
Laser Output	600mW

3.3 風洞実験結果

風圧・風速測定結果の代表例としてチムニー高さによる比較を行う。図 4 に D/L=1.0, 風向 0° のチムニーの風圧係数分布図を示す。チムニー高さが低い場合はチムニー部の負圧が比較的小さいが、これはチムニーが剥離域内にあるためと考えられる。一方、チムニー中・大の条

件ではチムニーが建物の剥離域外に存在しているために気流が衝突し、大きな負圧が得られていると考察する。図 5 に D/L=∞, 風向 0° の風速測定、PIV の結果を示す。ベクトル図や PIV からチムニーの剥離域が明確には見られなかった。また PIV と X 型熱線風速計で計測した風速を比較するとやや PIV の風速は低く算出されていた。しかし風速ベクトル図は概ね一致していると見受けられる。さらに PIV 解析から X 型熱線風速計では測定精度の関係から確認できなかった剥離域内の気流の流れを把握することができた。

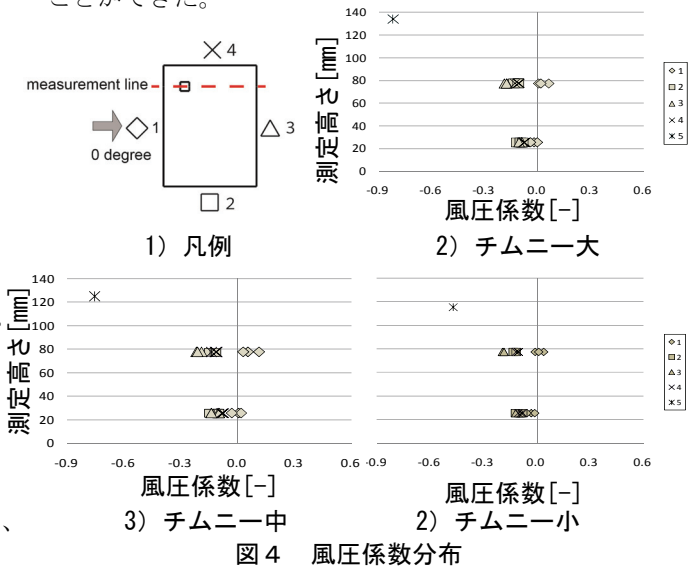


図 4 風圧係数分布

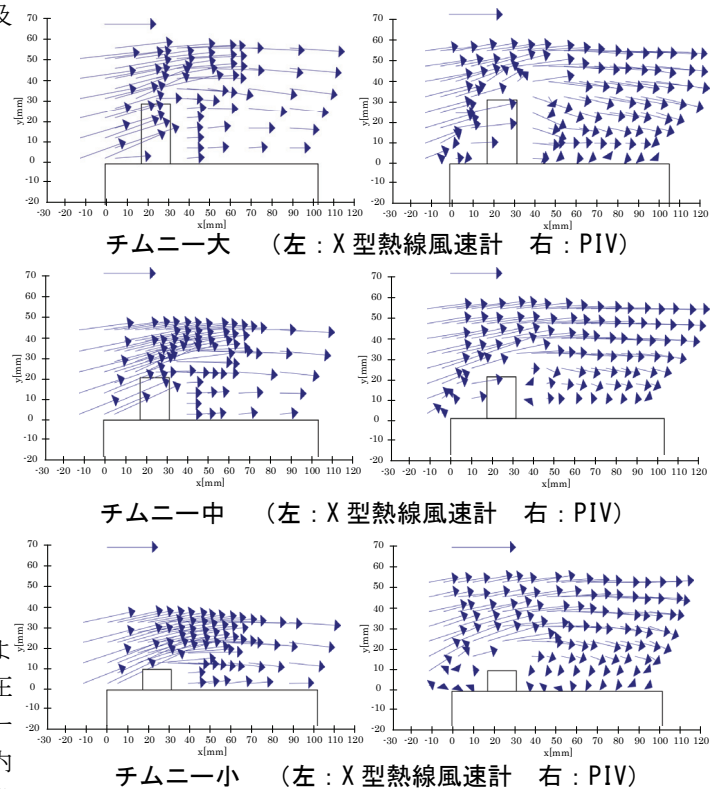


図 5 風速ベクトル図

4. 換気量計算

4.1 換気量計算概要

風洞実験を行い基礎データの整備を行ったが、換気促進装置を有する住宅の換気の可能性を示しただけで換気量を用いた考察はできていなかった。そこで風洞実験で得られた風圧データ及び拡張アメダス標準年データ⁴⁾の気温、風向及び風速データを用いて換気促進装置と1階壁面を介する単室2開口³⁾の年間換気量計算を行い換気促進装置の有用性を検証するとともに、換気口の設置を想定し1階側窓開口面積を変化させたCase1~Case6の6条件をパラメータ(表3)に設定し換気回数を用いて評価する。また開口は風圧測定点の位置に開けることを想定する。計算対象モデルは図1に示し1階リビング、ダイニング、キッチン及び2階廊下と吹き抜けの部の空間の換気回数を評価対象とする。また対象地域は次世代省エネ基準における地域区分のI~VIからI札幌、II弘前、III仙台、IV東京・大阪、V鹿児島、VI那覇の7都市を代表地とする。

表3 開口ケース

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
条件	A=1.0[m ²] 1000×1000	A=0.25[m ²] 500×500	A=0.0625[m ²] 250φ	A=0.0314[m ²] 200φ	A=0.0177[m ²] 150φ	A=0.0079[m ²] 100φ
抵抗係数	ζ=2.37	ζ=2.37	ζ=2.37	ζ=2.37	ζ=2.37	ζ=2.37

4.2 換気量計算条件

1) 風力換気計算条件

風力換気計算は合成 αA を算出し換気の式から計算を行う。越屋根の合成 αA 算出に関して、側窓形状抵抗・直角曲がり抵抗・越屋根からの気流拡大縮小抵抗を、チムニーは側窓形状抵抗・気流拡大縮小抵抗、動摩擦抵抗⁴⁾を考慮した。表4に換気促進装置別合成 αA 算出の諸条件をまとめて示す。なお勾配越屋根は越屋根両側開口時も計算する。越屋根両側開口時の換気量計算には越屋根のp-Q特性が必要であるため、小林ら²⁾により整備されたp-Q特性を用いて計算を行う。

2) 重力換気計算条件

重力と風力による換気を考慮し単室の年間換気量計算を行う。風力換気量計算時と同様に圧力損失を考慮し合成 αA を算出し計算を行う。室内温度の設定は夏期(6月~9月)、冬期(12月~3月)、中間期(4月5月10月11月)によって26℃、22℃、24℃と季節により室温一定に設定した。

4.3 換気量計算結果

1) 勾配越屋根換気量計算結果

図6にD面の一階に換気口を設置する事を想定して開口ケース毎の勾配越屋根を用いて大阪にて年間換気計算を行った。なお結果は24時間分データの移動平均を算出した時間毎の換気回数を示す。開口ケースが小さくなるにつれて換気回数も小さくなるのがグラフから読み取れる。また両側開口時に片側開口時と比べて換気回数が低い理

由としては大阪の風向特性の場合、年間を通して越屋根基部とD-sideに風圧係数差があまり生じないためである。A-sideやC-sideの一階に換気口を設置する事を想定した場合、片側解放時と同等の換気回数が得られていた。また図6と同様に図7にD-sideの一階に換気口を設置する事を想定して、勾配越屋根の両側解放と、片側のみ解放の3ケースを大阪にて風力換気と重力換気を考慮し年間換気量計算を行い、その結果の24時間分データの移動平均を算出し時間毎の換気回数のグラフを示す。重力を考慮し計算を行うと温度差の影響で換気回数が増加し、相対的な換気量の変動が小さくなっていることがわかる。

2) 換気促進装置別換気回数比較(表5)

D-sideの一階に換気口を設置する事を想定して、各換気促進装置を対象に大阪にて年間換気量計算を行い、時間毎の各開口パターンの換気回数の最大値を抽出し平均したものを表す。換気促進装置の有無を比較すると、全てのCaseにおいて約3倍の換気回数の差があった。換気回数0.5[回/h]を上回る条件はCase1~Case5の5条件であり給気口サイズ150φ以上のものとなった。

表4 換気計算各換気促進装置の抵抗係数まとめ³⁾

諸条件	越屋根大	越屋根中	越屋根小	チムニー大	チムニー中	チムニー小	勾配越屋根	陸屋根
	面積	4.12	2.37	0.96	0.64	0.64	0.64	3.1899
抵抗係数	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
体積	対象領域の体積[m ³] 134.4972							
抵抗係数	直角曲がり抵抗[-]	1.25	1.25	1.25				1.25
	チムニー管内抵抗[-]				0.11	0.07	0.04	
	側窓形状抵抗[-]	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37
	急傾流形状抵抗[-]	0.38	0.42	0.47	0.48	0.48	0.48	0.41
	急拡大形状抵抗[-]	0.46	0.67	0.86	1.00	1.00	1.00	0.57

※勾配越屋根と越屋根:基部面積、チムニー:トップの面積を表す

表5 換気促進装置比較

換気促進装置	換気経路 ³⁾	開口高さ[m]	各開口面積条件の換気回数[回/h]					
			Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
チムニー-M	チムニー上部	8.8	64.694	24.691	6.447	3.246	1.827	0.812
		8.1	49.921	18.938	4.940	2.487	1.400	0.622
勾配越屋根	両側開口	9.3	48.927	14.484	3.786	1.917	1.082	0.482
		9.3	29.216	7.711	1.935	0.972	0.547	0.243
		9.3	32.353	8.766	2.189	1.105	0.622	0.276
陸屋根L	最大値	9.3	49.428	14.525	3.792	1.919	1.083	0.482
		7.7	25.690	8.774	2.255	1.135	0.639	0.284
陸屋根M	最大値	7.6	25.096	8.625	2.219	1.116	0.628	0.279
		7.5	23.396	8.397	2.174	1.094	0.616	0.274
装置なし	最大値	1.7	8.793	3.016	0.776	0.390	0.220	0.098

※D面に換気口を設置し、換気促進装置と換気口の換気回数を算出した

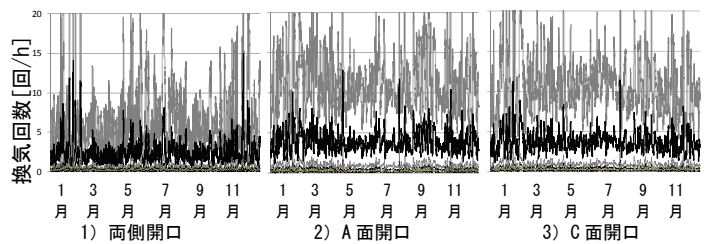


図6 開口別勾配越屋根年間換気量変動(風力のみ考慮)

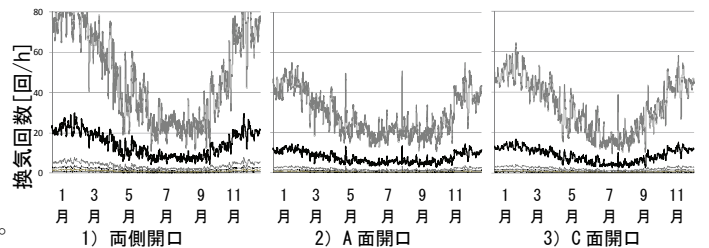


図7 開口別勾配越屋根年間換気量変動(風力+重力考慮)

5. CFDによる検証

これまで風洞実験で基礎データの整備を行い換気計算により評価を行ってきたが平均風速に基づく換気量のみでの評価を行っていたため、居住域における実際の換気性能が十分に評価されているとは言い難い。そこで図8に示す住宅模型を利用し、CFD非定常計算によるParticle Tracingの手法を用いて居住域における実際の換気効果を表すPurging Flow Rate^{文5)}を算出し平均風速に基づく換気量との比較を行うことで、越屋根の換気性能の検証及び評価を行うことを目的とする。CFDによる解析の第一段階として、乱流モデルを標準k-εモデルに設定して計算を行い、その結果を初期値として乱流モデルをLESに設定し、助走計算を0.4秒間(1/5000秒間隔、2000回)行った。その後2.0秒間(1/5000秒間隔、10,000回)の本計算を行い、平均値を算出した。流入境界に関して、Smirnovら^{文6)}の手法を用いて変動風を与えた。図9に解析領域を示す。

6.1 解析条件

PFRは局所領域内での汚染質発生量と平均濃度を用いて以下のように定義される。 $PFR = q_p / C_p$ ^{注2)} 粒子は居住域内で発生するものとし、発生数を1/5000秒間隔で2秒間、計270,000個、表1に示す座標を組み合わせた室内計27ヶ所から発生させた。また居住域に関して壁面表面では粒子が動かなくなると考え、対象領域を壁面から5.0mm内側の距離をおいた $0.00018m^3$ (50mm×45mm×80mm)とした。また開口条件は図10に示す5パターンに設定した。表6にCFD解析条件をまとめて示す。

6.2 CFD解析結果

本計算期間である7.0s間に発生させた全945,000個の粒子のうち、居住域内に存在する粒子数の算定を行った。図11にcase毎の居住域内部の粒子数及びPFRの時間変化を示す。これらの結果から、6.0sを過ぎた頃より居住域内粒子数が概ね一定となっているため、総計算時間として設定した7.0sは妥当と言える。このため、各開口条件において6.0s秒で定常状態に達した判断し、それ以降の粒子数を平均して算出したPFRを、開口部平均風速に基づいて算出した換気量を併せて図12に示す。この結果から、風圧係数差が小さいため換気量が小さく見積もられていたCase A及びCase Eにおいても一定の換気効果が得られていると言える。また、流入直後に流出する可能性があることから居住域内部での換気効果が不明瞭であったCase Cについては、実際は流入した気流が居住域内の空気と混合し平均風速に基づく換気量と概ね同等の大きな換気効果が得られていることが示されたと言える。

6. まとめ

換気促進装置を有する住宅の換気性能評価を行った。今後の展開として換気の式に補正係数を与えることでPFRを算出する式の提案を行っていく所存である。

表6 CFD解析条件

CFD Code	Fluent 13.0	
Turbulence Model	Large Eddy Simulation (Smagorinsky-Lilly Model)	
Algorithm	Implicit method(SIMPLE)	
Discretization Scheme for Advection Term	Central Difference	
Time Step	0.0002s	
Transition Term	2000+35000time step	
Boundary Condition	Inlet	Smirnov's method (Based on k and ε)
	Outlet	Gauge Pressure(0Pa)
	Walls	No Slip
Smagorinsky Coefficient	0.1	
Total Number of Grid	CaseA	2,084,538
	CaseB	2,084,538
	CaseC	2,083,438
	CaseD	2,083,438
	CaseE	2,082,838

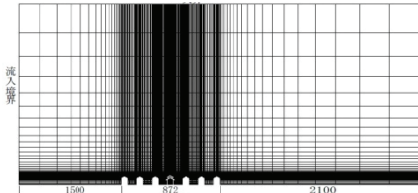


図9 CFD解析領域

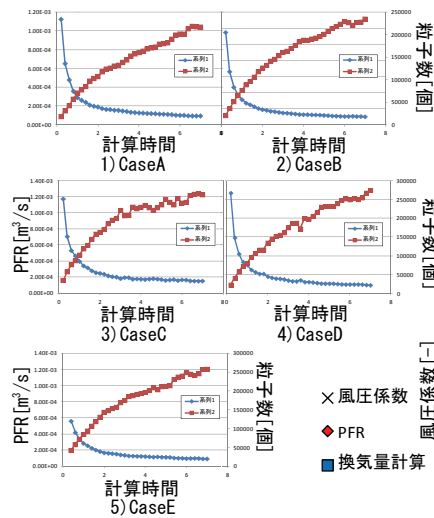


図11 CFD計算時間の妥当性確認

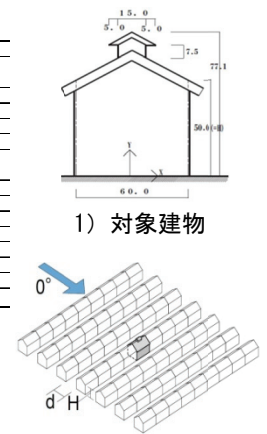


図8 CFD対象建物

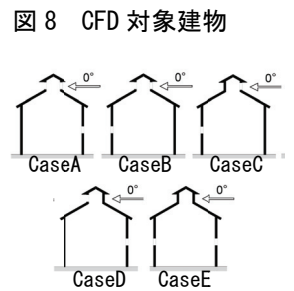


図10 開口パターン

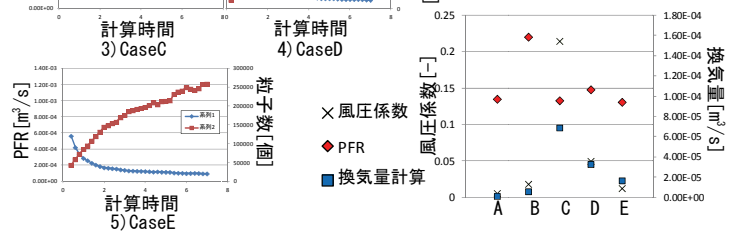


図12 PFR換気量比較

参考文献

- 1) 石原正雄：建築換気設計 pp72-pp109,pp282-pp283 朝倉書店 1969
- 2) 小林知広他：勾配屋根を有する独立住宅に設置された越屋根の換気特性, 日本建築学会環境系論文集, 第653号, pp. 595-601, 2010. 7
- 3) 小林知広他：住宅地における越屋根の風力換気性能予測手法に関する研究(その2) LESを用いた室内換気性能の検証, 日本建築学会学術講演梗概修(東海), pp. 659-660, 2012. 9
- 4) 社団法人 日本建築学会：拡張アメダス気象データ 1981-2000,
- 5) 伊藤一秀他：Particle Tracingによる Visitation Frequency, Purging Flow Rateの基礎的解析, 日本建築学会環境系論文集, 第534号, pp41-48, 2000.8
- 6) A.Smirnov他：Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle-Dynamics Modeling

注釈

注1) 絶対粗度εはASHRAE-Handbook-Fundamentals-p33(1981)を参考に、コンクリートを想定しε=3.0とした。注2) q_p ：単位時間当たり対象領域P内で発生する汚染質量[個/s] C_p ：対象領域の平均濃度[個/m³]注3)勾配越屋根の両側開口条件のみ3開口とする。

謝辞

本研究の一部は平成23年度日本学術振興会科学研究費補助金(研究助成)スタート支援, 22860067, 研究代表者：小林知広)による。また可視化実験及びPIV解析を行うに当たって多大なるご尽力を賜った奥田隼也氏(Photon)ならびに塩崎康弘氏(日本カノマックス)及び甲谷寿史先生(大阪大学) 桃井良尚先生(大阪大学)に謝意を表します。